

REGLAS DE ESCALA PARA BIFURCACIONES EN GUÍAS ÓPTICAS

J. Reolons, L. Torner, F. Canal

Dpt. de Teoria del Senyal i de la Comunicació, Univ. Politècnica de Catalunya,
E.T.S.E. de Telecomunicació, 08034-Barcelona

ABSTRACT

In this paper we introduce the use of normalized parameters to study an Y-junction, by means of a five-layer model and the step approximation method. In a similar way as it is done for three-layer and four-layer waveguides, we find a set of dimensionless parameters for five-layer waveguides that allows the description of their waveguiding features.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de cinco capas son de gran interés en el ámbito de la Óptica Integrada, dado que la mayoría de dispositivos electroópticos consisten básicamente en dos guías paralelas o adyacentes [1], las cuales pueden ser aproximadas mediante una guía de cinco capas [2-4]. Aunque en la literatura se encuentran métodos más precisos, la simplicidad del modelo de cinco capas permite obtener un buen conocimiento sobre el comportamiento de tales dispositivos con un ahorro apreciable de tiempo de cálculo.

La utilidad de hallar parámetros normalizados para la guía de cinco capas estriba en que permitirán reducir la dimensión del problema. El uso de parámetros normalizados fue introducido por Kogelnik y Ramaswamy [5] para guías de tres capas y por Hewak y Lit [6] para guías de cuatro capas. Siguiendo su metodología, hemos extendido el empleo de parámetros adimensionales al caso de guías de cinco capas para modos TE. El modelo normalizado resultante ha sido aplicado al estudio de uniones en Y.

2. TEORÍA

2.1. Parámetros normalizados para guías de cinco capas.

La superposición de dos guías planas de tres capas resulta en la estructura guiante de la figura 1(a), donde los índices de refracción n_2 y n_4 corresponden a las dos capas guiantes. De la misma forma que en la guía de tres capas, se define un grosor normalizado para cada capa guiante

$$V_2 = kd_2\sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

$$V_4 = kd_4\sqrt{n_4^2 - n_5^2}$$

donde $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda en el vacío. También se define una separación normalizada entre ambas capas

$$V_3 = \frac{2s}{d_2 + d_4}$$

y el índice efectivo normalizado

$$b = (N^2 - n_1^2)/(n_4^2 - n_5^2)$$

siendo N el índice efectivo. Finalmente definimos tres coeficientes de asimetría

$$a = (n_1^2 - n_5^2)/(n_4^2 - n_5^2)$$

$$g = (n_3^2 - n_1^2)/(n_4^2 - n_5^2)$$

$$p = (n_2^2 - n_1^2)/(n_4^2 - n_5^2)$$

donde a indica la asimetría entre las capas externas y p la asimetría entre las dos capas guiantes. Sustituyendo estos parámetros en la ecuación característica para modos TE obtendremos una expresión que nos permitirá obtener el valor de b en función de V_2, V_3, V_4, a, g , y p para los distintos modos propios de la estructura.

A partir de ahora nos limitaremos al caso $n_1 = n_3 = n_5$, ya que es el más común en los dispositivos electroópticos. En este caso se cumple $a = g = 0$, con lo que las únicas variables que restan son V_2, V_3, V_4 y p , siendo b una función de éstas. En este caso el parámetro normalizado p será una medida de la asimetría electromagnética de la estructura, mientras que la simetría geométrica estará relacionada con V_2 y V_4 . Bajo estas condiciones, podemos dividir el problema en dos casos. Cuando se cumple $n_2 < n_4$ tenemos que $p, b \in (0, 1)$, mientras que el caso $n_2 > n_4$ puede ser reducido al primero.

2.2 Aplicación a uniones en Y.

Las uniones en Y fueron analizadas por primera vez por Burns y Milton [2] y Yajima [3], aproximando las secciones no paralelas mediante una sucesión de segmentos escalonados (fig. 1(b)). Según este modelo, cuando se excita el modo fundamental en la guía de entrada se produce conversión modal entre éste y el modo de primer orden de la guía de cinco capas a medida que viajan a través de la región de separación. Éste fenómeno puede ser expresado mediante las ecuaciones

$$A_{j,n+1} = \sum_{i=0}^1 C_{ij} A_{i,n} \exp [(\beta_{j,n+1} - \beta_{i,n})z_n] \quad j = 0, 1 \quad (1)$$

las cuales indican la conversión modal en cada salto. $A_{j,n}$ y $\beta_{j,n}$ representan la amplitud compleja y la constante de propagación del modo j en el salto enésimo, cuya posición z_n está relacionada con la separación de las guías de salida por $z_n \simeq s_n/\alpha$, siendo α el semiángulo de bifurcación. C_{ij} es el coeficiente de conversión modal entre los modos i y j , siendo expresado por

$$C_{ij} = \frac{2\sqrt{\beta_{i,n}\beta_{j,n+1}}}{\beta_{i,n} + \beta_{i,n+1}} \frac{\beta_{j,n} + \beta_{i,n+1}}{\beta_{j,n} + \beta_{j,n+1}} \frac{I_{ij}}{\sqrt{I_{ii}I_{jj}}} = F_{ij} \frac{I_{ij}}{\sqrt{I_{ii}I_{jj}}} \quad (2)$$

donde I_{ij} es la integral de recubrimiento entre sus correspondientes distribuciones de campo evaluadas en los saltos n y $n+1$, respectivamente. Dado que I_{ij} sólo depende de la distribución transversal de campo de los modos propios, puede ser expresada enteramente en términos de los parámetros normalizados introducidos en la sección 2.1. Además, puede demostrarse que el factor F_{ij} de la ecuación (2) es una función débilmente dependiente de los parámetros de las guías [7]. Por consiguiente, C_{ij} dependerá básicamente de los parámetros normalizados.

Por otro lado, como se pone de manifiesto en la referencia 3, la conversión modal total aumenta a medida que lo hace el ángulo de bifurcación, hasta que alcanza un nivel de saturación para un cierto ángulo, que llamaremos $2\alpha_{sat}$. En este caso, los términos exponenciales tienden a la unidad, con lo que (1) se reduce a

$$A_{j,n+1} \simeq \sum_{i=0}^1 C_{ij} A_{i,n} \quad j = 0, 1 \quad (3)$$

y la conversión modal deja de depender del ángulo de bifurcación para el caso $\alpha > \alpha_{sat}$. Por tanto, será función únicamente de los parámetros normalizados.

Aplicando la expresión (3) de forma recurrente desde $V_3 = 0$ hasta ∞ obtendremos las amplitudes finales para cada modo guiado, las cuales ya no dependerán de V_3 . Es decir $A_{j\infty} = A_{j\infty}(V_2, V_4, p)$, con $j = 0, 1$.

3. RESULTADOS

Empleando el modelo de cinco capas normalizado hemos estudiado los efectos de las asimetrías en uniones en Y como la de la figura 1(b), asumiendo que se introduce inicialmente el modo TE_0 en la rama A con una potencia unidad y que los modos se propagan hacia las ramas B y C. Todos los resultados obtenidos han sido calculados para el caso de simetría geométrica ($V_2=V_4$), utilizando saltos discretos con $\Delta V_3 \equiv 2\Delta s/(d_2 + d_4) = 0.01$.

Para confirmar las predicciones teóricas de la última sección hemos calculado la potencia total convertida del modo TE_0 al TE_1 al final de la bifurcación, relativa a la potencia de entrada, para el caso $\alpha > \alpha_{sat}$, manteniendo p , V_2 y V_4 constantes y variando los índices y los grosores de las capas. Las diferencias entre los resultados obtenidos en los distintos casos (ver tabla 1) se mantienen siempre dentro de un margen razonable para un amplio rango de valores. Para ilustrarlo de forma más clara, en la figura 2 se ha representado la potencia final convertida en función del coeficiente de asimetría p para distintas configuraciones. Puede observarse de nuevo el excelente acuerdo entre los valores normalizados y los resultados obtenidos en los distintos casos para $\alpha > \alpha_{sat}$. Por otro lado, en la figura 2 también se puede ver cómo la conversión modal aumenta con la simetría entre las guías de salida. La razón de este comportamiento puede explicarse del siguiente modo: aplicando (3) de forma recurrente y conservando sólo los términos de primer orden obtenemos para el modo TE_1 de la guía de cinco capas

$$A_{1,\infty} \sim \int_0^\infty C_{01}(V_3) dV_3 \quad (4)$$

con lo que la amplitud modal convertida para el caso $\alpha > \alpha_{sat}$ está relacionada de forma directa con la superficie comprendida bajo la curva $C_{01}(V_3)$. En la figura 3 se representa esta función para distintos valores del parámetro p . Dado que $V_2 = V_3$, la curva con $p = 0.999$ corresponde a un caso casi simétrico. Podemos ver que la posición del máximo de C_{01} aumenta a medida que crece la simetría entre las ramas de salida con lo que la superficie comprendida bajo la curva también aumenta. Por consiguiente la conversión modal será máxima para $p = 1$.

Por último, hay que señalar que los parámetros normalizados tal como han sido definidos en el presente trabajo sólo son aplicables al caso $\alpha > \alpha_{sat}$, puesto que no permiten la normalización de los términos exponenciales de (1), como pone de manifiesto la curva representada mediante trazo discontinuo en la figura 2, obtenida para $\alpha = 1.5^\circ$. A medida que p disminuye, la diferencia $\beta_{j,n+1} - \beta_{i,n}$ en (1) aumenta, por lo que el valor de α_{sat} también crece y, por consiguiente, nos alejamos de la región de saturación. En este caso se hace imprescindible añadir un nuevo parámetro que permita una normalización completa del problema [7].

CONCLUSIONES

En este trabajo se han introducido parámetros normalizados para guías de cinco capas, siete en total, seis de los cuales son suficientes para describir su comportamiento, siendo el índice efectivo normalizado b función de ellos. A continuación, se han aplicado al caso de dos guías divergentes de tres capas, formando una unión en Y, siendo necesarios tres parámetros para describir el comportamiento de tales dispositivos para el caso $\alpha > \alpha_{sat}$, los grosores normalizados de cada guía, más una medida de asimetría. Los resultados calculados numéricamente muestran la validez del modelo de cinco capas normalizado para un amplio conjunto de guías. Dentro de este rango, se han obtenido un conjunto de curvas universales para los coeficientes de conversión modal. También se ha puesto de manifiesto la necesidad de un parámetro adicional para describir el comportamiento de uniones en Y con ángulos de bifurcación pequeños. Éste será el objetivo de subsiguientes trabajos.

REFERENCIAS

- [1] A. Selvarajan, J.E. Midwinter. "Photonic switches and switch-arrays on LiNbO₃", *Opt. Quantum Electron.*, vol. 21, pp. 1-15, 1989.
- [2] W.K. Burns, A.F. Milton. "Mode conversion in planar-dielectric separating waveguides". *ibid.*, QE-11, pp. 32-39, 1975.
- [3] H. Yajima. "Coupled mode analysis of dielectric planar branching waveguides". *ibid.*, QE-11, pp. 749-755, 1978.
- [4] R.A. Forber, E. Marom. "Symmetric directional coupler switches", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-22, pp. 911-919, 1986.
- [5] H. Kogelnik, V. Ramaswamy. "Scaling rules for thin-film optical waveguides". *Appl. Opt.*, vol. 13, pp. 1857-1862, 1974.
- [6] D.W. Hewak, J.W.Y. Lit. "Generalized dispersion properties of a four-layer thin-film waveguide", *ibid.*, vol. 26, pp. 833-841, 1986.
- [7] J. Recolons, L. Torner. *preprint*.

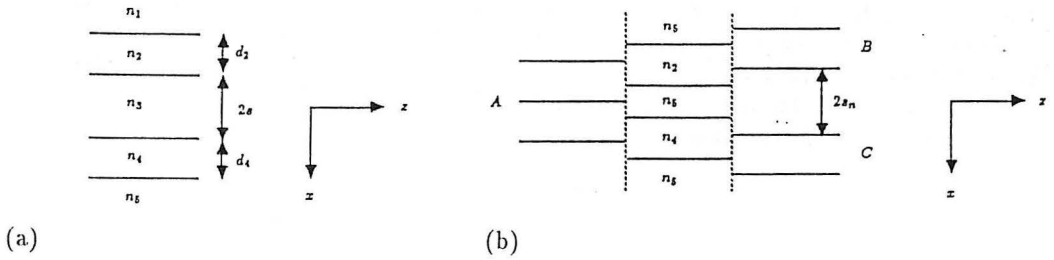


Figura 1: (a) Modelo de cinco capas para dos guías paralelas de tres capas. (b) Aproximación por saltos de dos guías adyacentes.

λ	n_2	n_4	d_2	d_4	P_1
0.6328	2.2010	2.202	4.5539	3.2201	0.20114
0.6328	2.2025	2.205	2.8792	2.0359	0.20176
0.6328	2.205	2.21	2.0347	1.4388	0.20245
0.6328	2.2103	2.2207	1.4142	1	0.20347
0.6328	2.2207	2.2411	1	0.7072	0.20545
1.52	2.2025	2.205	6.9158	4.8902	0.20077

Tabla 1: Potencia final convertida del modo TE₀ al TE₁ relativa a potencia de entrada (P_1) para distintas configuraciones. $n_1 = n_3 = n_5 = 2.2$, and $p = 0.5$, $V_2 = V_4 = 3$ para todos los casos.

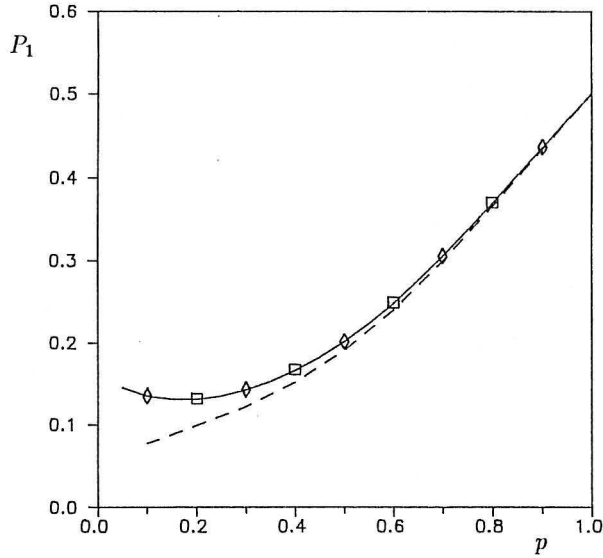


Figura 2: Potencia relativa correspondiente al modo TE_1 al final de la unión en Y en función de la asimetría entre las ramas de salida para el caso $V_2 = V_4 = 3$. La curva de trazo continuo corresponde al modelo normalizado, tomando $\alpha > \alpha_{sat}$. El símbolo \square se refiere al caso $\lambda = 0.6328\mu m$, $n_1 = 2.2$ y $n_4 = 2.21$, mientras que el símbolo \diamond se refiere al caso $\lambda = 0.6328\mu m$, $n_1 = 2.2$ y $n_4 = 2.2023$, ambos con $\alpha > \alpha_{sat}$. La línea de trazo discontinuo ha sido obtenida tomando $\alpha = 1.5^\circ$, $n_1 = 2.2$, $n_4 = 2.202$ y $\lambda = 0.6328\mu m$.

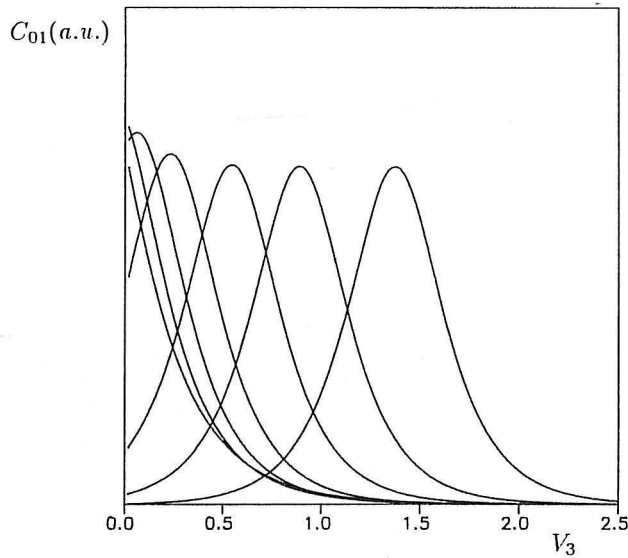


Figura 3: Coeficiente de conversión entre los modos TE_0 and TE_1 en función de la distancia normalizada entre las ramas de salida para el caso $V_2 = V_4 = 3$, tomando p como parámetro. De izquierda a derecha, las curvas corresponden a los valores $p = 0.2$, $p = 0.4$, $p = 0.6$, $p = 0.8$, $p = 0.95$, $p = 0.99$ y $p = 0.999$.